

# EL MODELO CIELAB, LAS FÓRMULAS DE DIFERENCIA DE COLOR Y EL USO DE LA NORMA EUROPEA EN 12878 EN MORTEROS Y HORMIGONES COLOREADOS

## CIELAB MODEL, COLOR-DIFFERENCE FORMULAS AND USE OF THE EUROPEAN EN 12878 STANDARD IN COLORED MORTARS AND CONCRETES

A.López<sup>1</sup>, A. R. Di Sarli<sup>2</sup>

1.- Investigadora Asistente CICPBA LEMIT. lopezanahi2002@gmail.com

2.- Investigador Superior-CIDEPINT (CICPBA-CONICET)

### RESUMEN

Embellecer las mezclas cementíceas es una alternativa que se utiliza cuando surge la necesidad de valorar la apariencia de superficies. Esta cualidad, puesta de manifiesto por su color y brillo, admite disímiles terminaciones. Las diferentes alternativas de apariencia están directamente relacionadas con los materiales elegidos y sus posibles combinaciones, con la superficie obtenida tras el contacto con los moldes o por someterla a algún tratamiento superficial, y con las condiciones del curado. Otro aspecto muy importante es cuantificar qué tan diferente es un color de otro. El objetivo del presente trabajo es definir el color comparando la fórmula de diferencia de color total CIEDE1976 con la CIEDE2000 para indicadores de diferencias o similitudes. Con ese fin se utilizó la norma Europea EN12878. El color se midió en morteros elaborados con proporciones fijas de cemento gris o blanco, agua, filler calizo, arena y pigmento (óxidos de hierro o ftalocianinas cúpricas de distinta procedencia). Por último, se comparó el color de morteros con el de hormigones que contenían dicha matriz. Los resultados muestran la variabilidad del color en función de la procedencia de pigmentos de un mismo color y de los diferentes tipos de cemento. A la vez se cuantifica lo parecido que puede ser el color de un hormigón al de su mortero.

**Palabras clave:** Modelo CIELAB, Morteros y hormigones coloreados, Diferencia de Color.

### ABSTRACT

Embellish the cementitious mixtures is an alternative that is used when the need to assess the appearance of surfaces arises. This quality, evidenced by their color and gloss, supports dissimilar endings. Different alternatives of appearance are directly related to the chosen materials and combinations thereof, with the surface obtained after contact with the molds or by subjecting it to a surface treatment, and with the

curing conditions. Another very important aspect is to quantify how different is a color of another. The aim of the present work is to define the color comparing the CIEDE1976 total color difference formula with the CIEDE2000 one for indicators of differences or similarities. To this end, the European EN12878 standard was used. The color was analyzed in mortars made with fixed proportions of gray or white cement, water, filler limestone, sand and pigment (iron oxides or cupric phthalocyanine from different sources). Finally, the color of the mortars was compared with the obtained in concretes containing the same matrix. The results show color variability depending on both the origin of pigments of the same color and the different types of cement. Also how similar can be the color of a concrete and its mortar is quantified.

**Keywords:** *CIELAB Model; Colored mortars and concretes; Color Difference.*

## INTRODUCCIÓN

El color en el hormigón es una tendencia que ha despertado el interés en áreas que tradicionalmente no lo utilizaban. Además de los usos tradicionales en estructuras portantes [1] se diseñan esculturas, monumentos [2] y elementos decorativos [3]. Las causas principales de ese interés radican en el menor costo frente a otros materiales y en las distintas formas que pueden conseguirse aprovechando los moldes o realizando moldeado. Sin embargo, estas nuevas aplicaciones conllevan otras problemáticas, por un lado, la elección del color y la posibilidad real de obtenerlo y, por otro, la búsqueda de las texturas. A su vez, el costo de algunos de los agentes colorantes suele incrementar hasta 100% el del metro cúbico de mezcla.

El color final del mortero y del hormigón además de estar muy vinculado con la elección de diferentes materiales y de la terminación, también lo está con el curado. Estudios anteriores verificaron que incrementar el contenido de pigmento rojo o amarillo de 3% a 6% en peso del cemento tiene diferentes consecuencias sobre la saturación. Con el primero la saturación mantiene valores cercanos a las 33 unidades y con el segundo ascienden de 33 a 44 unidades. También hubo diferencias del color según la superficie de contacto [4]; por otro lado, evaluaciones más recientes muestran importantes manchas a tan sólo 7 días de curado húmedo [5]. La variedad de materiales presentes en el mercado permite obtener una amplia gama

de colores justificando la versatilidad del material. Si el agregado grueso no está expuesto, el mortero es el responsable de aportar el color final, situación que conduce a realizar estudios en este nivel. Otro trabajo da cuenta de las diferentes texturas que se consiguen con moldes de madera, acero y/o vidrio [6]. La elección de los materiales adquiere suma importancia para conseguir colores, por ello seleccionar el tipo y proporción de los componentes será determinante; también el curado lo modifica, y considerando la posibilidad de obtenerlos es muy difícil asegurar cuáles son las variables que modifican al color luego de definir los materiales. Asimismo, sabiendo que el color es una sensación visual, deben definirse no sólo las características del objeto (en este caso el elemento de mortero u hormigón) sino también las del observador y del entorno.

La definición del color en la industria de la construcción ha sido estudiada por muchos investigadores [6-10] y, en algunos casos [7-9], el modelo o espacio de color CIELAB fue el elegido para cuantificarlo pero también lo fue el modelo Munsell. Esta elección tiene que ver más con el equipo que se disponga (elevado costo) y con el dominio de los diferentes modelos.

A continuación se describe el modelo CIELAB dibujado en la Figura 1. Este modelo queda definido por tres variables que se representan en sistemas cartesianos o polares; en el primero se utilizan los

valores de luminosidad ( $L^*$ ) y las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$ ; en el segundo, los parámetros  $L^*$ , saturación ( $C^*$ ) y tono ( $h^*$ ) (Ver Ecs. 1 y 2). En un sistema ortogonal se lo representa mediante un eje vertical ( $L^*$ ), que indica claridad u oscuridad, y un plano horizontal conformado por los ejes  $a^*$  y  $b^*$ . El eje  $a^*$  refleja la variación rojo-verde, siendo positivo para el primero ( $+a^*$ ) y negativo para el segundo ( $-a^*$ ); el  $b^*$  la variación amarillo-azul, siendo positivo para el primero ( $+b^*$ ) y negativo para el otro ( $-b^*$ ) [11, 12]. Por otro lado, la saturación está asociada a qué tan vívido es un color y el tono ( $h^*$ ) es el ángulo que indica si el color es rojo ( $0^\circ$ ), amarillo ( $90^\circ$ ), verde ( $180^\circ$ ) o azul ( $270^\circ$ ).

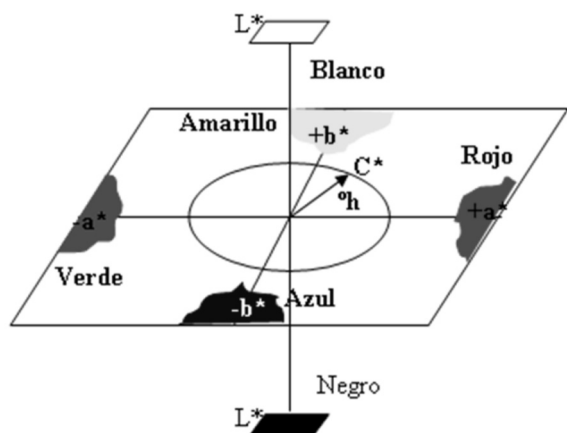


Figura 1: Modelo o espacio de color CIELAB.

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$h^* = \arctg \frac{b^*}{a^*} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Además, las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  se han utilizado como indicador de cambios de color y decidir sobre la elección de técnicas de limpieza aplicadas sobre piedras ubicadas en los muros de iglesias [13], también para el seguimiento de daños en hormigones expuestos al fuego [14].

Para comparar diferencias de color entre distintas muestras, evaluar la similitud o realizar reproducciones del color se calcula el parámetro

diferencia de color total ( $\Delta E$ ). Este último permite juzgar niveles de diferencia de color percibida por el ojo humano y desde 1931 la CIE lo está perfeccionando para acercarse a la realidad con mayor exactitud [11, 15, 16].

La diferencia de color  $\Delta E^*_{76}$  entre los puntos a y b de un objeto es la distancia euclidiana entre el estímulo de color en ambos puntos y representa, aproximadamente, la diferencia de color percibida por el estímulo de color en el espacio de color CIELAB.

Este fenómeno se produce cuando los objetos son vistos por un observador adaptado a un campo de cromaticidad, que no es muy diferente de la media de la luz en un entorno idéntico de blanco a gris.

La Ec. (3) calcula esta magnitud vector, y se especifica en la norma europea EN 12878 [17].

$$\Delta E^*_{76.ab} = \left[ (\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

Donde:

$$\Delta L^* = L^*_b - L^*_a$$

(Diferencia de luminosidad: más claro o más oscuro)

$$\Delta a^* = a^*_b - a^*_a$$

(Diferencia de coordenada  $a^*$ : más rojo o más verde)

$$\Delta b^* = b^*_b - b^*_a$$

(Diferencia de coordenada  $b^*$ : más amarillo o más azul)

En la práctica industrial, pequeñas diferencias de color han mostrado efectos no uniformes sobre los valores calculados. Esto significa que las diferencias  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  no representan la diferencia percibida por el ojo humano. Por ello, cambios en las condiciones externas pueden modificar las magnitudes percibidas en diferentes rangos y direcciones. Como resultado, se necesitan ajustes con el fin de mejorar esta evaluación

mediante la corrección de los diferentes efectos que interfieren en la diferencia de color. La Ec. (4) muestra la fórmula CIEDE2000.

$$\Delta E_{00} = \left[ \left( \frac{\Delta L'}{K_L S_L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta C'}{K_C S_C} \right)^2 + R_T \left( \frac{\Delta C'}{K_C S_C} \right) \left( \frac{\Delta H'}{K_H S_H} \right) \right]^{1/2} \quad (4)$$

Donde las variables medidas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  son transformadas a valores de  $L'$ ,  $a'$ , y  $b'$  para corregir el ángulo del tono, el croma o saturación y la luminosidad [12].

A su vez, la fórmula incluye las correcciones específicas para la no uniformidad del modelo CIELAB como las denominadas funciones de ponderación ( $S_L$  (diferencia de luminosidad),  $S_C$  (diferencia Croma), y  $S_H$  (diferencia del tono)) y los parámetros que representan la influencia de la iluminación y las condiciones de visualización para la evaluación de diferencia de color (los llamados factores paramétricos  $K_L$ ,  $K_C$ ,  $K_H$ ).

En el presente estudio, los factores paramétricos se establecieron como = 1 porque las condiciones de referencia fueron similares a las que normalmente se encuentran en la práctica industrial. La inclusión del término rotación da cuenta de la interacción entre Croma y las diferencias de tono en la región azul y una modificación del eje  $a^*$  del espacio de color CIELAB, que afecta principalmente a los colores de bajo croma o saturación (colores neutros).

Por un lado, la fórmula CIEDE1976 permite cuantificar rápidamente cual es la diferencia que el ojo humano percibe pero no es representativa de la realidad, razón por la que surgen las correcciones de la fórmula en la CIEDE2000 [12, 15], por cierto muy compleja, de mayor aplicación y exigencia en la industria. Por ello resulta interesante considerar el intervalo que existe entre los valores de diferencias obtenidos en ambas fórmulas.

Hay una escala de diferencias de color  $\Delta E^*_{76}$  determinada según la fórmula CIEDE1976 que, en algunos estudios, fue aplicada para definir

diferencias de color en superficies de hormigón [18], mayormente en superficies pintadas. Dicha escala se divide en: no visible ( $\Delta E^*_{76} < 0,2$ ), muy leve ( $\Delta E^*_{76}: 0,2-0,5$ ), leve ( $\Delta E^*_{76}: 0,5-1,5$ ), notable ( $\Delta E^*_{76}: 1,5-3,0$ ), muy notable ( $\Delta E^*_{76}: 3,0-6,0$ ), grande ( $\Delta E^*_{76}: 6,0-12,0$ ), muy grande ( $\Delta E^*_{76} > 12,0$ ). A medida que el valor aumenta, las diferencias son más notorias. La misma escala permitió también cuantificar la homogeneidad del color en paneles de hormigón color rojo o amarillo [19], sin embargo, no hay comparaciones establecidas con los valores que se obtendrían por medio de la fórmula CIEDE2000.

Los pigmentos sintéticos constituyen los agentes colorantes con mayor uso en la industria de la construcción. Tales son los casos de pinturas aplicadas sobre muros y aberturas (forma en la cual se consiguen colores más saturados o más vivos) y en la masa del hormigón (forma que, en cambio, se consiguen colores menos saturados o apagados).

El empleo de pigmentos en el hormigón ha exigido regular la calidad y composición de los mismos así como también la forma de incorporarlos a las mezclas. La normativa existente aborda el uso de pigmentos en mezclas cementíceas, tal es el caso de la norma americana ASTM C 979 “Standard Specification for Pigments for integrally colored concrete” [20] y la europea EN 12878 “Pigments for the colouring of building material based on cement and/or lime-specifications and methods of tests” [17]. Además existe una guía para especificaciones que utilicen pigmentos o cemento blanco (PCA SP 388 “Guide for specifying white and colored concrete”) y diversos organismos e instituciones como el ACI (American Concrete Institute), la APA (Architectural Precast Association), el ASCC/DCC (Decorative Concrete Council Cast Stone: Cast Stone Institute), el DSC (Decorative Concrete Network), el PCI (Precast/Prestressed Concrete Institute) que tratan sobre los requerimientos generales y particulares de los pigmentos [21].

Las normas ASTM C 979 y EN 12878 mencionan las características físicas y químicas de los pigmentos y los requerimientos mínimos que deben verificarse en las propiedades en estado fresco o endurecido de los materiales de construcción, entre ellos el hormigón; incluyen otras verificaciones de rutina tales como la evaluación de las estabilidades alcalina, térmica y al clima, y finalmente describen los criterios de control de calidad. Ambas normas recomiendan no usar más del 10% de pigmento expresado en peso de cemento. En particular, la norma EN 12878 propone distintos límites para el caso de hormigón armado e incluye, además, el modelo CIELAB para definir al color y la fórmula CIEDE1976 para establecer diferencias de color. Para ello sugiere también una proporción de materiales y una metodología de mezclado para elaborar morteros.

En Argentina, la norma IRAM 1618 [22] reglamenta cómo cuantificar el color blanco, principalmente para realizar evaluaciones del efecto del cemento blanco. No se han encontrado normas IRAM relacionadas con determinaciones del color cuando los objetos son saturados con agentes colorantes en la industria de la construcción. Si bien en pinturas pareciera estar resuelto, en hormigones habría que realizar estudios de repetibilidad para iniciar los primeros pasos destinados a crear una normativa.

Los objetivos de este trabajo son, por un lado, determinar los parámetros de color que propone la norma europea y cuantificar los niveles de similitud que se reflejan numéricamente cuando se cambia la marca del pigmento y/o el color del cemento. Con ese fin se planteó la primera parte y se estudiaron morteros. Sin analizar la composición química, en el mercado existe una gran variedad de precios y muchas veces se busca desestimar las marcas más costosas. Por eso, luego de medir el color en diferentes morteros elaborados en base a las indicaciones de la norma EN 12878, se calculan los valores de diferencias de color según las fórmulas CIEDE1976 y CIEDE2000. Luego, en una segunda parte, se demuestra una aplicación de estas fórmulas para ver las similitudes del color

entre un mortero y su correspondiente hormigón. También se muestra cómo el estudio sobre la fase mortero adquiere interés ya que se puede correlacionar con el color final del hormigón y así evitar mayor volumen de trabajo.

## DETALLES EXPERIMENTALES

### Procedimiento propuesto por la norma para definir el color y parámetros calculados

La norma europea EN 12878 presenta los lineamientos para elaborar morteros con proporciones fijas de materiales, establece tiempos y velocidades de mezclado según un método mecánico, y para medir el color solamente indica el modelo CIELAB. La mezcla elaborada es colocada en recipientes y la superficie de medición terminada con cuchara. Señala, además, la fórmula  $\Delta E^*_{76}$  para que los fabricantes establezcan niveles de tolerancias. Este parámetro permite comparar colores y establecer niveles de similitud. El alcance de la norma involucra, entre otros, pigmentos del tipo óxidos e hidróxidos de hierro, ftalocianinas cúpricas y negro de humo.

En este trabajo para cada caso se midieron el parámetro  $L^*$  y las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$ . Luego, a partir de estas coordenadas, de la saturación ( $C^*$ ) y del tono ( $h^*$ ) se calcularon los parámetros que proporcionan un mejor entendimiento del color dentro del modelo CIELAB.

Las determinaciones de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  fueron realizadas con el colorímetro Dr. Lange.

### Materiales y mezclas

En la primera parte se elaboraron morteros con cemento gris (G) o blanco (B), filler calizo, dos marcas de pigmentos sintéticos (identificadas como 1 y 2) del tipo óxidos de hierro, ftalocianina cúprica y negro de humo. De la marca 1 se utilizaron tres pigmentos del tipo óxidos de hierro, de color rojo (1R), amarillo (1A) o negro (1N) y dos ftalocianinas cúpricas azul (1Z) o verde (1V). De la marca 2 se dispuso de los óxidos



de hierro rojo (2R) o amarillo (2A) y de negro de humo 2Nh. Se utilizó arena silíceas de color amarillento. El mezclado fue mecánico y consistió en homogeneizar 1200 g de arena (tamaño comprendido entre 0,2 y 1,0 mm), 600 g de arena desde 1,0 a 2,0 mm, 200 g de filler calcáreo, 15 g de pigmento rojo, amarillo, azul, verde o negro (2,5% en peso del cemento), o 5 g de negro de humo (0,83% en peso del cemento), durante 10 s a velocidad lenta; luego se incorporaron 175 g de agua, cuando fue totalmente absorbida se añadieron 500 g de cemento y se mezcló durante 200 s a igual velocidad. La consistencia que se obtuvo fue en todos los casos muy seca.

En la segunda parte se determinaron los parámetros en morteros y en hormigones; para ello se utilizó cemento gris (G), filler calcáreo, el agregado fino mencionado anteriormente y piedra granítica como agregado grueso. También se utilizó un aditivo superfluidificante, necesario para obtener mezclas autocompactantes. Los pigmentos utilizados corresponden a los colores 2R, 2A, 2Nh o 1N en contenidos de 3%, 5%, 5% ó 3% en peso de cemento, respectivamente.

Con los morteros se moldearon prismas de 40x40x160 mm y con los hormigones prismas de 430x105x75 mm. Transcurridas 24 h ambos tipos de muestras se quitaron de los moldes y se mantuvieron en una cámara acondicionada a humedad relativa 55±5% y temperatura 20±1 °C.

En la primera parte se registraron 10 determinaciones/mortero y en la segunda parte 30 determinaciones/mortero u hormigón.

Para cuantificar los niveles de similitud, que se reflejan numéricamente al cambiar la marca del pigmento o el color del cemento, con los valores promedios de  $L^*$ ,  $a^*$ , y  $b^*$  se calcularon las diferencias de color total CIEDE1976 y CIEDE2000. Además, se evaluaron las diferencias entre las procedencias de pigmento y estimación del color en hormigón (H) por medio del correspondiente mortero (M).

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### Primera parte: uso de la normativa para analizar distintos colores

La Tabla 1 detalla los valores promedio de  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  y  $h^*$  en cada uno de los morteros. El efecto de los distintos cementos indicó en el mortero B un aumento de  $L^*$  de aproximadamente 10 unidades con respecto al de G. En ambos casos, como es de esperar en los colores que varían en la escala de grises, una tendencia a la desaturación caracterizó a las muestras y fue mayor en el mortero B dado que el valor de  $C^*$  disminuyó a 4,1. Por otro lado,  $L^*$  aumentó 9 unidades cuando se usó cemento blanco, sin embargo, cuando se incorporó pigmento de la misma marca sólo lo hizo en 3 unidades. Con pigmento negro la luminosidad se redujo significativamente a 50 y 35 unidades al usar 1N o 2Nh, respectivamente. En los morteros que incorporaron pigmento rojo o amarillo (óxidos de hierro), verde o azul (ftalocianinas), la saturación aumentó entre 20 y 35 para los óxidos de hierro, y 13-16 para las ftalocianinas mientras que los tonos alcanzados variaron entre 22° y 31° para el rojo, 72°-78° para el amarillo, 133°-141° para el verde, y 219°-227° para el azul. Cabe destacar que al comparar los colores estos resultaron muy diferentes.

Para juzgar qué tan diferente es el color si se cambia el cemento pero se usa la misma marca de pigmento o si se cambia esta última y se mantiene el color del cemento, la Tabla 2 compara los valores de diferencia de color  $\Delta E^*_{76}$  (CIEDE1976) y  $\Delta E_{00}$  (CIEDE2000) calculados a partir de los valores promedio de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ . La diferencia  $\Delta E^*_{76}$  es *grande* entre el cemento blanco y el gris y, en orden ascendente, *muy notable* cuando los morteros incorporaron pigmento 1A (3,1), 1V (3,6), 1R (3,8), 2A (4,3), 2R (5,0) o 1Z (5,6). A su vez, el cambio de la marca de pigmento acentúa aún más los valores de  $\Delta E^*_{76}$ , fue muy grande entre los pigmentos 2Nh y 1N (15,4), grande entre los pigmentos amarillos (con ambos cementos) o rojo combinado con el cemento gris. Con el cemento

Tabla 1. Valores promedios de  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  y  $h^*$  en morteros.

Color	Mortero	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h^*$
Control	G	72,9	1,9	7,7	7,9	76,1
	B	81,9	1,3	3,9	4,1	71,6
Rojo	1GR	59,0	25,3	15,2	29,5	30,9
	2GR	56,6	19,9	9,8	22,2	26,2
	1BR	56,0	26,2	13,0	29,2	26,3
	2BR	54,0	24,1	9,7	26,0	21,9
Amarillo	1GA	70,9	7,0	32,0	32,8	77,8
	2GA	67,2	7,7	23,7	24,9	71,9
	1BA	73,3	8,3	33,3	34,3	76,0
	2BA	69,7	5,4	26,2	26,7	78,4
Azul	1GZ	58,0	-9,9	-8,0	12,7	219,0
	1BZ	60,6	-11,7	-12,6	17,2	227,2
Verde	1GV	57,8	-10,8	11,6	15,9	132,8
	1BV	60,5	-12,3	9,9	15,8	141,1
Negro	1GN	50,2	0,4	0,0	0,5	211,5
		34,8	-0,2	-0,6	1,2	297,0

Tabla 2. Diferencias de color total  $\Delta E^*_{76}$  y  $\Delta E_{00}$ . Comparación de colores y de marcas.

Morteros	$\Delta E^*_{76}$	$\Delta E_{00}$
B-G	9,8	7,2
1GR-1BR	3,8	3,2
2GR-2BR	5,0	3,5
1GA-1BA	3,1	2,1
2GA-2BA	4,3	3,4
1GZ-1BZ	5,6	3,9
1GV-1BV	3,6	3,1
2GR-1GR	8,0	4,4
2BR-1BR	4,4	2,8
2GA-1GA	9,2	5,1
2BA-1BA	8,5	4,3
2GNh-1GN	15,4	14,0

blanco o gris, el pigmento rojo disminuyó el valor de  $\Delta E^*_{76}$  y fue notable.

Todos los valores calculados usando la fórmula de  $\Delta E_{00}$  fueron menores que los obtenidos con la de  $\Delta E^*_{76}$ . La bibliografía referida a color sugiere que lo calculado con esta última fórmula no es tan representativo de la realidad por eso se corrigió con la de CIEDE2000; sin embargo, la normativa aplicada al hormigón sólo hace referencia al sistema CIELAB y la fórmula CIEDE1976. Sin los artificios matemáticos ni funciones de corrección que tiene la fórmula de  $\Delta E_{00}$ , la correspondiente a  $\Delta E^*_{76}$  tiene un tratamiento más sencillo, es muy práctica y rápidamente puede tenerse una noción de la diferencia de color.

En la Tabla 3 se ha ponderado cada uno de los valores de  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  que interfieren en el cálculo de  $\Delta E^*_{76}$  (ver Tabla 2) para discriminar y detectar cual es el término que incide con mayor peso. Claro está que cuando se compara el color

del cemento G-B, el parámetro  $L^*$  fue el que más incidió ( $\approx 85\%$ ). Cuando se incorporó a dichas mezclas la marca de pigmento rojo 1R, la diferencia también fue importante debido al cambio de  $L^*$  ( $\approx 62\%$ ), sin embargo, esta tendencia no tuvo lugar al utilizar la marca 2R, donde la diferencia principal se da por modificaciones de la coordenada  $a^*$  (más o menos rojo en un  $73\%$ ). El uso de pigmento amarillo 1A también presenta similar tendencia a la mostrada con el rojo de su misma marca (1R), no obstante la incidencia de las coordenada  $a^*$  y  $b^*$  está equilibrada en  $\approx 20\%$ . Dicho equilibrio se repite para el parámetro y las dos coordenadas con el pigmento amarillo 2A ( $\approx 33\%$  para variaciones de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ ). El uso de pigmento verde 1V también tuvo similar incidencia que con el 1A. En cambio, con el pigmento 1Z la mayor incidencia fue debido a los cambios de la coordenada  $b^*$  ( $\approx 60\%$ ).

**Tabla 3.** Ponderación de los términos de  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  sobre el valor de  $\Delta E^*_{76}$ .

Morteros	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$
B-G	85	0	15
1GR-1BR	62	5	34
2GR-2BR	27	73	0
1GA-1BA	64	20	17
2GA-2BA	35	31	34
1GZ-1BZ	21	11	68
1GV-1BV	59	19	22
2GR-1GR	9	46	45
2BR-1BR	22	22	57
2GA-1GA	16	1	83
2BA-1BA	18	12	70
2GNh-1GN	100	0	0

Independientemente del color de cemento utilizado, cuando se compararon pigmentos de color rojo o amarillo de distinta marca las diferencias estuvieron más influenciadas por las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$ , por el contrario, cuando se cambió el tipo de pigmento negro las modificaciones fueron debidas a las diferencias de  $L^*$ . De lo analizado

se infiere que al cambiar el color del cemento hay mayor incidencia del parámetro  $L^*$  pero si lo que se cambia es la marca de pigmento también son diferentes las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$ .

La Figura 2 muestra dos gráficos típicos destinados a mostrar la magnitud de la saturación, la tendencia de los diferentes tonos en un plano cromático y los diferentes niveles de luminosidad ( $L^*$ ) y saturación ( $C^*$ ) calculados en los morteros que se hicieron con la marca 1. A la izquierda  $a^*$  vs.  $b^*$  y a la derecha  $L^*$  vs.  $C^*$ . También se presentan los diagramas de barras de valores promedios de  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $L^*$  y  $C^*$  acompañados por el desvío estándar. Cabe destacar que para la cantidad de determinaciones realizadas los desvíos fueron  $< 2,0$  en  $L^*$ ,  $< 1,2$  en  $a^*$ ,  $< 1,5$  en  $b^*$  y  $< 1,6$  en  $C^*$ .

La Figura 3 muestra los dos gráficos típicos de color para los morteros elaborados con la marca 2. A la izquierda  $a^*$  vs.  $b^*$  y a la derecha  $L^*$  vs.  $C^*$ . También se exhiben los diagramas de barras de valores promedios de  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $L^*$  y  $C^*$  acompañados por el desvío estándar. Los valores alcanzados fueron muy parecidos a los obtenidos con la marca 1 mientras que los desvíos fueron  $< 2,1$  en  $L^*$ ,  $< 1,5$  en  $a^*$ ,  $< 1,9$  en  $b^*$  y  $< 1,8$  en  $C^*$ .

### Segunda parte: estimación del color en el hormigón por medio de estudios comparativos entre morteros y hormigones

La Tabla 4 muestra los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  y  $h^*$  determinados para comparar los valores obtenidos en los morteros (M) diseñados con las mismas proporciones que los hormigones (H). También se incluyen los valores de diferencia de color  $\Delta E^*_{76}$  y  $\Delta E_{00}$  entre H y su correspondiente M.

La posibilidad de estimar el color de los hormigones por medio de estudios previos sobre morteros tuvo mejor aproximación al utilizar como pigmento óxido de hierro negro o negro de humo. Si bien todos los valores de  $\Delta E^*_{76}$  indicaron cambio de color, estos fueron menores para los



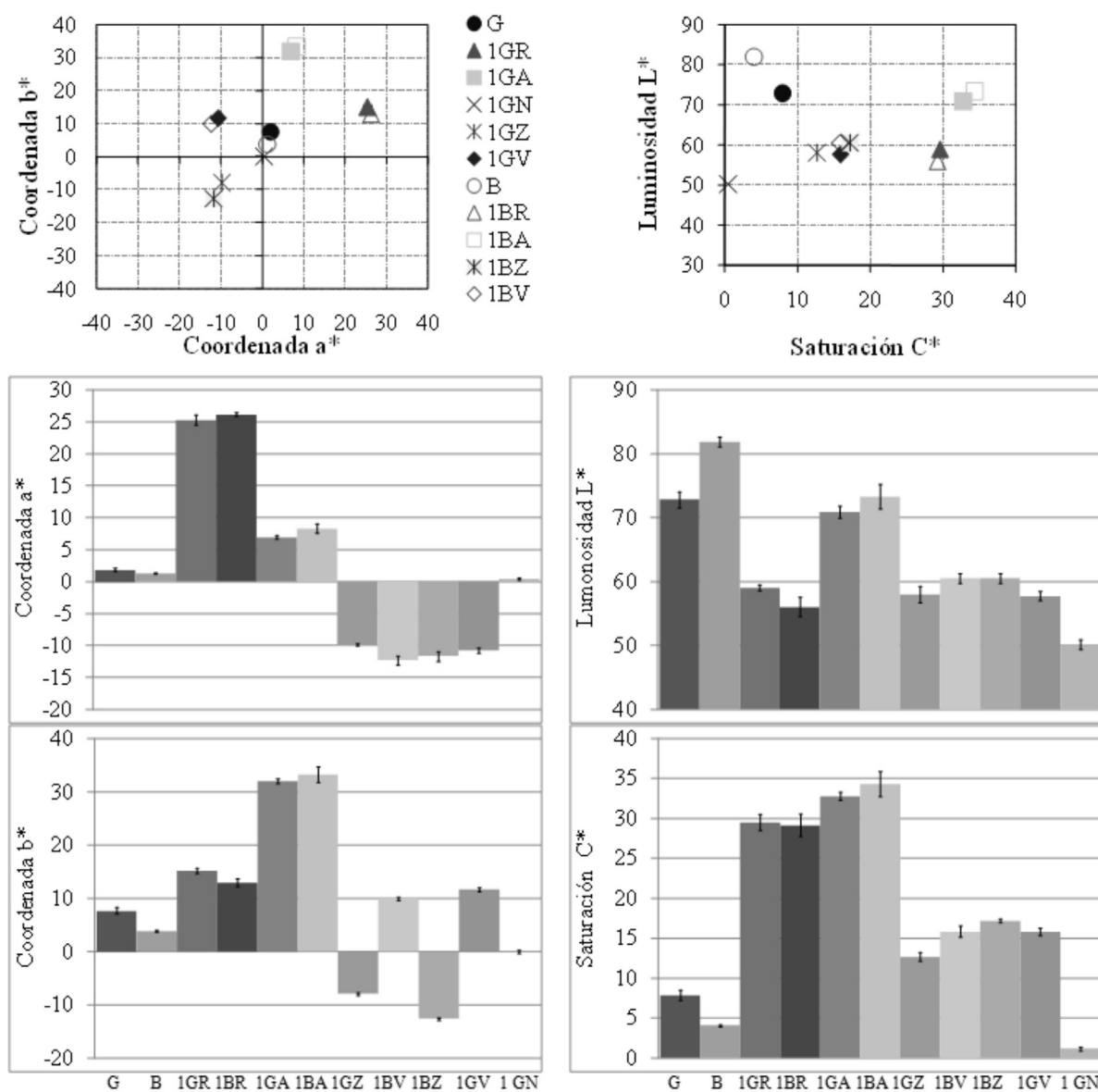


Figura 2.  $b^*$  vs  $a^*$  (izq.) y  $L^*$  vs  $C^*$  (der) de morteros con pigmento 1.

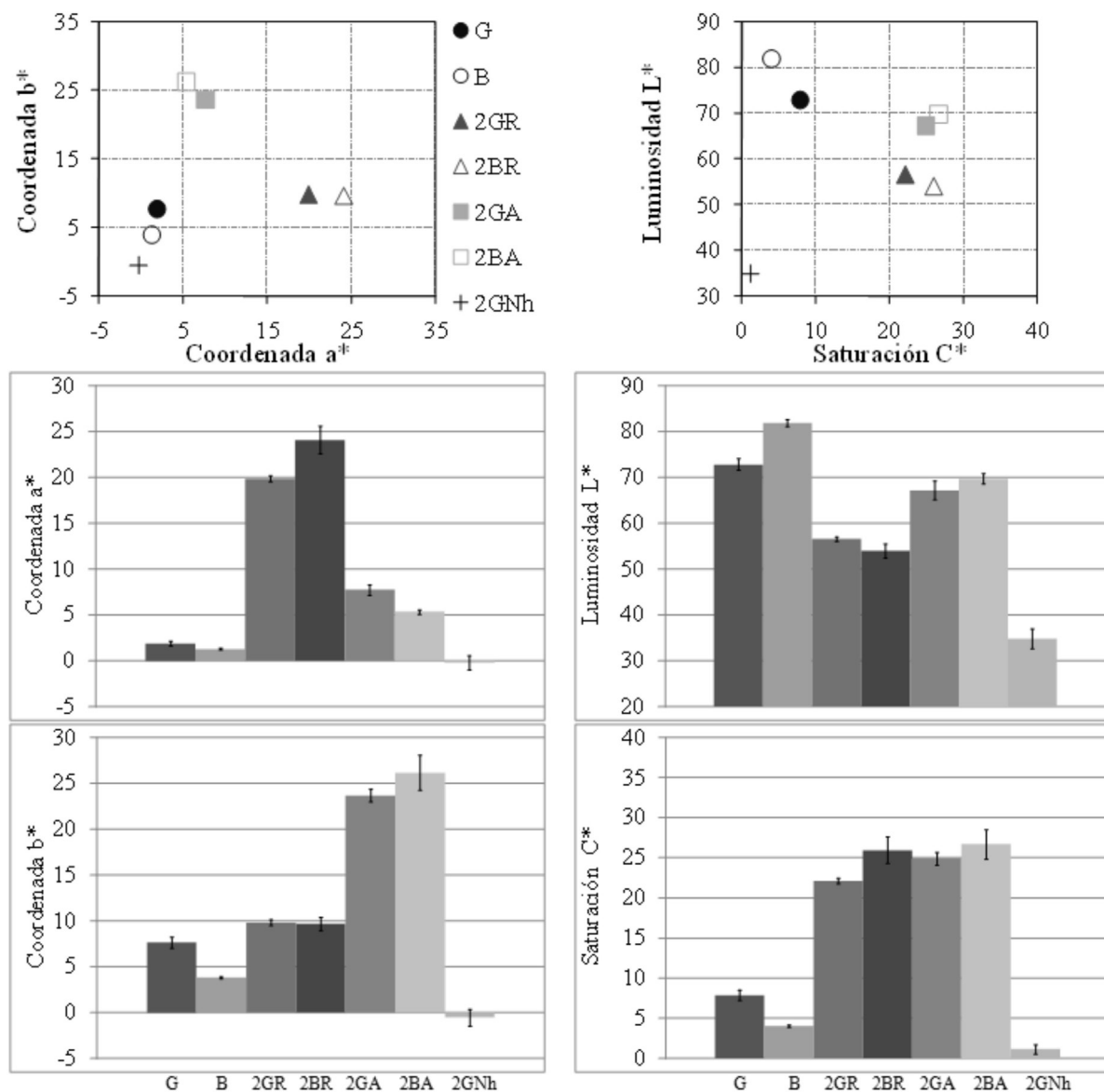


Figura 3.  $b^*$  vs  $a^*$  (izq.) y  $L^*$  vs  $C^*$  (der) de morteros con pigmento 2.

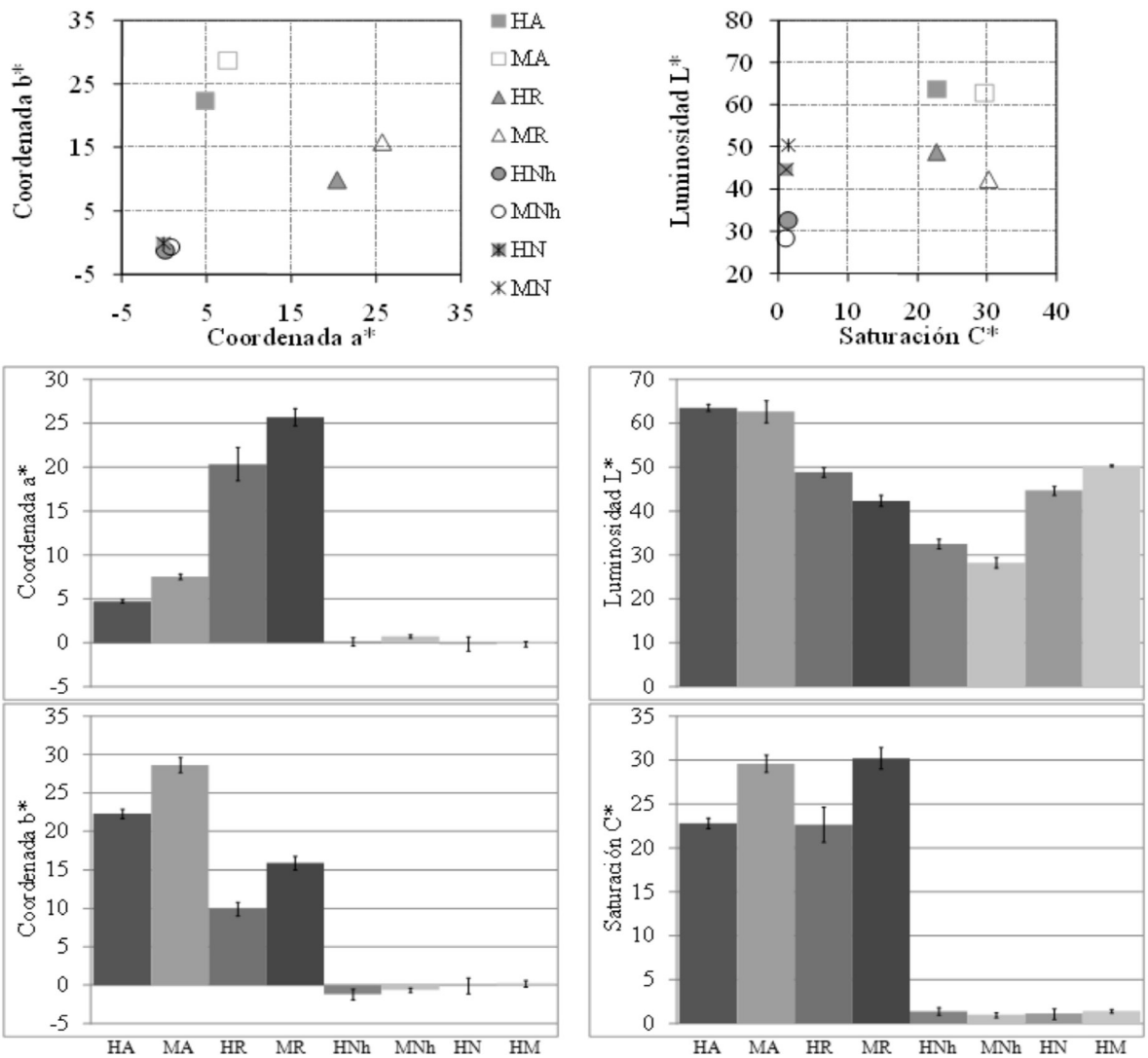
pigmentos mencionados. El pigmento negro tiende a desaturar el color de la mezcla, en cambio, con el rojo o amarillo las mezclas se saturan y fueron más notorias las diferencias de color. Nuevamente los valores de  $\Delta E_{00} < \Delta E_{76}^*$ .

En la Figura 4 se comparan los resultados obtenidos sobre morteros (M) y hormigones (H) con los parámetros  $b^*$  vs.  $a^*$  (izquierda) y  $L^*$  vs.  $C^*$  (derecha). Los puntos se ubican en una

misma zona, sugiriendo la posibilidad de valorar el color en morteros y estimarlo en el hormigón. Los morteros presentaron un leve incremento de la saturación mientras que la luminosidad se mantuvo constante. También se presentan los diagramas de barras de valores promedios de  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $L^*$  y  $C^*$  acompañados por el desvío estándar. Tales desvíos fueron  $< 2,5$  en  $L^*$ , con una fuerte variación en el hormigón HN (DV: 7,1) lo que sugiere heterogeneidad del color en el mismo,

**Tabla 4.** Valores promedios de  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  y  $h^*$  en hormigones y morteros. Diferencias de color total  $\Delta E^*_{76}$  y  $\Delta E_{00}$

Color	Muestra	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h^*$	$\Delta E^*_{76}$	$\Delta E_{00}$
Amarillo	MA	62,7	7,5	28,7	29,7	75,3	7,0	3,4
	HA	63,6	4,8	22,3	22,8	78,0		
Rojo	MR	42,4	25,7	15,9	30,2	31,7	10,3	7,4
	HR	48,8	20,4	9,9	22,7	26,0		
Negro de humo	MNh	28,2	0,7	-0,6	1,0	322,0	4,4	3,5
	HNh	32,5	0,2	-1,2	1,4	279,8		
Negro óxido	MN	50,4	-0,1	0,2	1,4	178,1	5,7	5,6
		44,7	-0,1	-0,1	1,1	203,0		



**Figura 4:**  $b^*$  vs  $a^*$  (izq.) y  $L^*$  vs  $C^*$  (der) de morteros con pigmento 2.

una posible causa de este resultado es atribuible al color “arratonado” que se obtuvo con el pigmento óxido de hierro negro;  $< 2$  en  $a^*$ ,  $< 1,0$  en  $b^*$  y  $< 2$  en  $C^*$ .

## CONCLUSIONES

La norma europea EN 12878 brinda una metodología rápida para definir el color y realizar comparaciones. Por un lado, utiliza el espacio de color CIELAB y por otro sugiere la fórmula CIEDE76 para realizar evaluaciones (“pasa o no pasa”) con objetivos industriales. La norma, además de presentar los lineamientos para elaborar las mezclas y mencionar al espacio CIELAB como método para definir el color, trabaja sobre morteros lo que resulta una ventaja por ser más económico. El menor volumen de trabajo agiliza la obtención de resultados y economiza el uso de agentes colorantes, cuyo costo es elevado por más pequeñas que sean sus proporciones. Más allá de estas ventajas, debe tenerse en cuenta que la

consistencia del mortero sugerida por la norma es muy seca y dificulta el preparado de las muestras, que no especifica cuántas determinaciones realizar sobre ellas y tampoco establece realizar la comparación con hormigones.

El trabajo permitió definir que determinar el nivel de similitud del color implica utilizar cemento blanco o gris con el mismo contenido de pigmento. También mostró la gran diferencia de color que se obtiene mezclando cementos del mismo color con pigmentos de diferente origen.

Las diferencias de color obtenidos con la fórmula CIEDE2000 fueron de menor valor absoluto que las calculadas con la CIEDE1976. Esto significa que hay necesidad de ajustar esos valores a los nuevos niveles de percepción. Ambas fórmulas también permitieron juzgar que la similitud del color entre hormigones y morteros fue mayor cuando se utilizó como pigmento óxido de hierro negro o negro de humo.

## REFERENCIAS

- 1.- Benítez A, Bálsamo H. Hormigones arquitectónicos: blanco y coloreado. En Hormigones Especiales. La Plata, Argentina: Autoeditor. 2004, pp. 309-330.
- 2.- López A, Zerbino L, Traversa P. Evolución tecnológica del hormigón visto empleado en estructuras, monumentos y esculturas. En 1er. Congreso Iberoamericano y VIII Jornada “Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio”. 10 y 11 de Septiembre de 2009 – La Plata, Buenos Aires, Argentina. T6-36.
- 3.- <http://www.beton.org/startseite/>
- 4.- López, A., Positieri, M.J., Oshiro, A., Zerbino, R., 2008. “Estudio de la fluidez y el color en pastas de cemento con pigmentos destinadas al diseño de hormigones autocompactables coloreados”. En Color: ciencia, tecnología y enseñanza: ArgenColor 2006. Ed. J.L. Caivano y M.A. López. Grupo Argentino del Color. pp.123-132.
- 5.- IRAM 1534. Hormigón de Cemento Portland. Preparación y curado de probetas para ensayos de laboratorio.
- 6.- López, A., Tobes, J.M., Giaccio, G., Zerbino, R., 2009. Advantages of mortar-based design for coloured self-compacting concrete”. Cement and Concrete Composites 31, 10, pp. 754-761.

- 7.- Coelho, F., 2000. “Variación del color y textura superficial de hormigones vistos, con adición de pigmentos inorgánicos, sometidos a distintos estados de exposición ambiental.” Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 248 p.
- 8.- Positieri, M. J., 2005. “Propiedades físico-mecánicas y durabilidad del hormigón coloreado.” Tesis doctoral, Universidad Tecnológica Nacional Fac. Reg. Cba, 254 p.
- 9.- Passuelo, A., 2004. Análise de Parâmetros influentes na cromaticidade e no comportamento mecânico de concretos à base de cimento branco. Mestre em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 175p
- 10.- Oayka Kircheim, A., Passuelo, A., Carpena Coitinho Dal Molin, D., Pinto Da Silva Filho, L.C., 2005. CONCRETO Ensino, Pesquisa e Realizações. Volume 2. Seção VIII Concreto para Fins Especiais. Capítulo 47: Concreto Branco. pp. 1453-1491.
- 11.- Lozano, R. D. El color y su medición. Bs. As.: Américalee S.R.L; 1978.
- 12.- CIE 15. Technical Report draft. Colorimetry. 3 Edition. 82 p.
- 13.- Fort, R.F., Mingarro, M.C., López, J., Rodríguez, B., 2000. “Chromatic parameters as Performance Indicator for Stones Cleaning Techniques”. Color Res. Appl. 25, pp. 442-446.
- 14.- Annerel, E., Taerwe L., 2011. “Methods to quantify the colour development of concrete exposed to fire”. Const Build Mater. 25, pp. 3989-3997.
- 15.- Melgosa, M.M., Huertas, R., 2004. “Relative significance of the terms in the CIEDE2000 and CIE94 color-difference formulas”. Optical Society of America 21, 12, pp. 1-7.
- 16.- Sharma, G., Wu, W., Dalal, N., 2000. “Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observations CIE”. Color Res. Appl. 30, pp. 21-30.
- 17.- EN 12878: 2005. “Pigments for colouring of building materials based on cement and/or lime – Specification and methods of test”.
- 18.- Teichmann, G., 1990. “The Use of Colorimetric Methods in the Concrete Industry?”. Betonwerk+Fertigteile-Technik/Concrete Precasting Plant Technol. 10, pp. 58-73.
- 19.- López, A., 2013. “Patrimonio moderno: Evaluación de los aspectos estéticos que modifican la apariencia del hormigón”. En 3er. Congreso Iberoamericano y VIII Jornada “Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio”. 16 a 18 de Octubre de 2013 – La Plata, Buenos Aires, Argentina. T4-39.
- 20.- ASTM 979 ASTM C 979. “Standards Specification for Pigments Used to Integrally Color Concrete”.
- 21.- López, A., 2012. “Diseño y Caracterización del Hormigón Autocompactante Coloreado”. Tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata. 189 p.
- 22.- IRAM 1618. “Cemento Portland Blanco. Determinación de la blancura”.